

DOI: 10.7652/xjtuxb201410006

一种用于杂波中机动目标跟踪的 自适应关联波门设计方法

靳标¹, 纠博¹, 苏涛¹, 刘宏伟¹, 张龙^{1,2}

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安;

2. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安)

摘要: 针对传统关联波门设计方法在应用于机动目标跟踪时容易引起失跟现象的问题,提出一种新的自适应关联波门设计方法。该方法在综合交互多模型概率数据关联算法的基础上进行关联波门设计,当波门内不存在有效量测时,首先以最大机动水平对应的模型误差协方差对关联波门进行适当扩大,确保量测点迹进入波门。然后假定目标的机动能力已知,在目标运动状态的预测范围内利用观测信息寻找最小均方误差意义下的最优波门中心。该方法可以从根本上改善关联概率,从而降低失跟率,提高目标跟踪精度。仿真结果表明,与传统关联波门设计方法相比,该方法的失跟率降低了 30%~40%,而且目标机动时的跟踪精度提高了 20%~30%。实测数据同样验证了该方法的有效性。

关键词: 机动目标跟踪;交互多模型;概率数据关联;关联波门

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0035-07

A Method to Design Adaptive Correlating Gate for Maneuvering Target Tracking in Clutter

JIN Biao¹, JIU Bo¹, SU Tao¹, LIU Hongwei¹, ZHANG Long^{1,2}

(1. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A novel method to design adaptive correlating gate is proposed to solve the problem that the traditional correlating gate design method is easy to cause tracking loss when it is applied in the case of tracking a maneuvering target. The correlating gate is designed based on the comprehensive IMM-PDA algorithm. If there are no validated measurements in the correlating gate, the covariance of model errors with maximal maneuvering level is used to appropriately enlarge the gate to guarantee validated measurements existing in the gate. Then it is assumed that the target maneuvering ability is known, and the information of measurements is used to find the optimal gate centre among the predictive range of target motion in the sense of minimizing the mean square error. Since the method fundamentally improves the association probability, the tracking loss probability is decreased and the tracking accuracy is improved. Simulation results and comparisons with the traditional correlating gate design methods show that the tracking loss probability of the proposed method is reduced by 30%-40% and the maneuvering tracking

收稿日期: 2014-02-26。 作者简介: 靳标(1986—),男,博士生;苏涛(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271291);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-09-0630)。

网络出版时间: 2014-09-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140923.0924.001.html>

accuracy is improved by 20%-30%. The effectiveness of the proposed method is also verified by the raw radar data.

Keywords: maneuvering target tracking; interacting multiple model; probabilistic data association; correlating gate

杂波环境下的机动目标跟踪是目标跟踪领域中的热点和难点问题之一,其关键在于解决量测来源和目标运动状态的不确定性^[1-3]。对于雷达数据处理系统而言,首先要确认量测点迹是来自于杂波还是目标,关联波门则为实际工程应用提供了一个有效工具^[4],在量测点迹的确认过程中具有重要作用。

关联波门是用来判断量测点迹是否源自目标的决策门限,它是以被跟踪目标的预测位置为中心,确定该目标下一时刻观测值可能出现范围的一块区域^[4]。当目标发生机动时,由于跟踪算法的参数设置难以与目标实际运动状态完全匹配,因此预测结果与目标运动状态存在较大偏差^[5]。如果采用较小的关联波门,目标的真实量测将有可能落在关联波门之外,从而丢失所跟踪的目标。这时需要根据目标的机动情况自适应地调整波门,而以往的自适应关联波门设计大多是在传统交互多模型(interacting multiple model, IMM)概率数据关联(probabilistic data association, PDA)算法的基础上进行的^[6-13],这在很大程度上限制了算法的整体性能。由于传统的 IMM-PDA 算法分别对 IMM 中的各个模型使用 PDA 方法,即每个状态模型分别对应一个关联波门,各个模型利用各自的量测集合进行数据关联和状态更新,因此该算法在量测集合的选取和模型概率的计算等方面都存在问题,很容易产生失跟、误跟现象^[12]。单就关联波门设计而言,文献^[14-15]提出的扩大关联波门方法虽然在一定程度上减缓了目标机动时航迹丢失的问题,但是由于波门中心仅由 IMM 模型的预测值决定,关联概率并未得到改善,仍然有可能造成失跟现象;同时关联波门的扩大也引入了更多的虚假量测,使得跟踪精度下降,运算量也大大增加。因此,最优关联波门存在两层含义:一是使目标真实量测的漏警概率尽可能小;二是使落入波门内的杂波点尽可能少^[16]。这样,就需要对波门中心和大小共同进行调整。文献^[17]提出在目标的机动范围内以量测点与波门中心的马氏距离最小为准则寻找最优波门中心,但是该方法只考虑了单个量测点迹的情况,并不具有一般意义。

针对以上问题,本文在综合 IMM-PDA 算法的

基础上,首先通过适当逐步扩大关联波门来引入有效量测,然后利用量测信息,在目标状态的预测范围内以最小均方误差为准则寻找最优的波门中心,以改善关联概率,从而降低失跟率,提高跟踪精度。

1 综合 IMM-PDA 算法

传统 IMM-PDA 算法分别对 IMM 滤波器中的各个子滤波器使用 PDA 算法,即每个子滤波器使用各自的关联波门进行量测确认。文献^[12]指出这种算法结构存在诸多缺陷,比如由于各个子滤波器利用不同的关联波门,即采用不同的量测集合进行状态更新,因此各个子滤波器可能跟踪了不同的航迹,如果还用模型概率进行综合,则跟踪性能将会降低,严重时将引起失跟。此外,当模型个数和量测点迹较多时,此算法的运算量也相当可观。在综合 IMM-PDA 算法中,多个子滤波器共享同一个关联波门,即各个子滤波器的候选回波相同,这样就避免了传统 IMM-PDA 算法的缺点,而且可能得到最优的量测集合,提高了数据关联的效率。

综合 IMM-PDA 算法首先对各个子滤波器 $k-1$ 时刻的状态进行输入交互,之后对各子滤波器执行一步预测,获取各子滤波器的量测预测值和新息协方差。综合量测预测值(即波门中心)为

$$\mathbf{z}_{k|k-1} = \sum_{m=1}^M \mu_{k|k-1}^m \mathbf{z}_{k|k-1}^m \quad (1)$$

式中: M 为 IMM 算法中的模型数; $\mu_{k|k-1}^m$ 为 k 时刻模型 m 被预测有效的概率; $\mathbf{z}_{k|k-1}^m$ 为 k 时刻模型 m 的量测预测值。综合新息的协方差矩阵为

$$\mathbf{S}_k = \sum_{m=1}^M \mu_{k|k-1}^m [\mathbf{S}_k^m + (\mathbf{z}_{k|k-1}^m - \mathbf{z}_{k|k-1}) \cdot (\mathbf{z}_{k|k-1}^m - \mathbf{z}_{k|k-1})^T] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_k^m$ 为模型 m 对应的新息协方差矩阵。

有效量测的确认采用关联波门实现,即

$$\mathbf{Z}_k = \{\mathbf{z}_k \mid (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k|k-1})^T \mathbf{S}_k^{-1} (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k|k-1}) \leq \gamma\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Z}_k$ 为有效量测的集合; $\mathbf{z}_k$ 为量测向量,可能来自于目标,也有可能来自于杂波; $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 由式(1)给出; $\mathbf{S}_k$ 由式(2)给出; γ 可由 χ^2 分布表根据量测落入关联波门的概率 P_G 查得。关联波门的体积为^[4]

$$V_k = c_{n_z} \gamma^{n_z/2} |S_k|^{1/2} \quad (4)$$

式中: c_{n_z} 为 n_z 维单位球体积。根据落入关联波门的量测信息,可以定义综合量测为

$$z_k = \sum_{i=0}^{m_k} z_k^i \beta_k^i \quad (5)$$

式中: m_k 为 k 时刻落入关联波门的量测个数; z_k^i 表示 k 时刻关联波门内的第 i 个量测, z_k^0 表示 k 时刻关联波门内没有来自目标的量测; β_k^i 为 k 时刻第 i 个量测来自于目标的概率,即关联概率,包括参数模型和非参数模型两种情况^[4]。

最终交互输出的结果与标准 IMM 算法^[5] 相似,输出均值为

$$\hat{x}_{k|k} = \sum_{m=1}^M \mu_{k|k}^m \hat{x}_{k|k}^m \quad (6)$$

其协方差为

$$P_{k|k} = \sum_{m=1}^M \mu_{k|k}^m [\bar{P}_{k|k}^m + (\hat{x}_{k|k}^m - \hat{x}_{k|k})(\hat{x}_{k|k}^m - \hat{x}_{k|k})^T] \quad (7)$$

式中: $\hat{x}_{k|k}^m$ 为模型 m 在 k 时刻的状态估计; $\bar{P}_{k|k}^m$ 为利用综合量测 z_k 对各个子滤波器进行状态更新后,各个子滤波器的状态估计的误差协方差,可表示为^[12]

$$\bar{P}_{k|k}^m = \beta_k^i P_{k|k-1}^m + (1 - \beta_k^i) P_{k|k}^m + \tilde{P}_k^m \quad (8)$$

其中, $P_{k|k-1}^m$ 和 $P_{k|k}^m$ 分别为模型 m 的预测误差和估计误差协方差, $\tilde{P}_k^m$ 为综合量测带来的误差协方差。

2 自适应关联波门设计

综合 IMM-PDA 算法对各个状态模型使用统一的关联波门,可以得到最优的量测集合,各项性能指标均优于传统 IMM-PDA 算法^[12],因此在综合 IMM-PDA 算法的基础上进行关联波门设计,可以显著提高杂波中机动目标跟踪的整体性能。

图 1 为自适应关联波门原理示意图,当目标在 $k-1$ 时刻发生机动时,非自适应关联波门由于未能及时做出调整,有可能导致关联波门内连续多个采

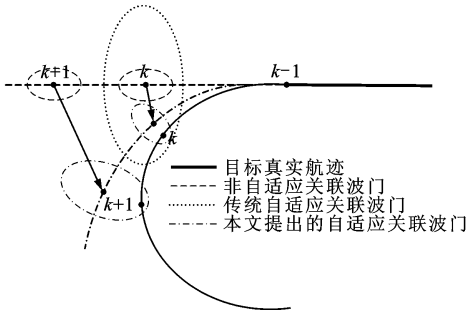


图 1 自适应关联波门原理示意图

样周期无有效量测,从而造成目标的丢失。传统自适应方法对关联波门进行一次扩大^[14] 或多次扩大^[15],可以减少失跟现象的发生,但是此类方法并未对波门中心做出调整,从而无法改善关联概率,而且波门的扩大也造成了落入波门内的虚警点增多,影响综合量测的质量^[18]。本文针对此问题,采取两步法调整关联波门,当关联波门内无有效量测时,首先逐步扩大关联波门以保证波门内存在量测点迹,然后利用量测信息以最小均方误差为准则对波门中心进行寻优,重新调整关联波门的中心位置,以改善关联概率,提高跟踪精度,最后再将波门大小调整至标准波门,以减少波门内的虚警点数,从而减少运算量,提高跟踪精度。本文方法的具体流程如图 2 所示。

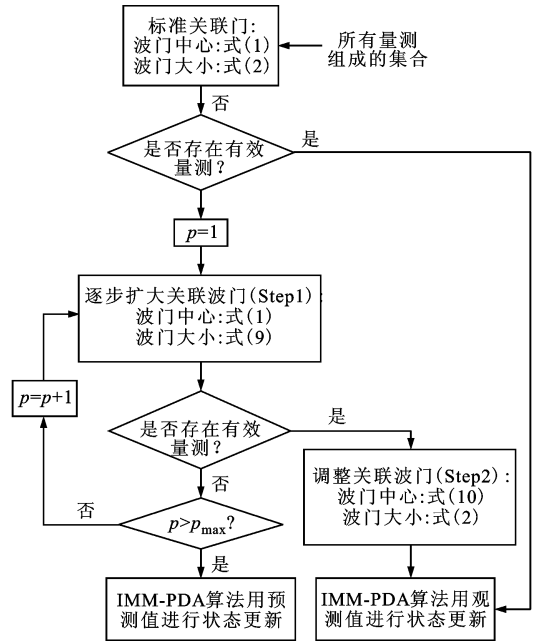


图 2 本文提出的自适应关联波门设计方法流程图

Step 1 逐步扩大关联波门

由式(4)可知,关联波门的体积大小与综合新息的协方差 S_k 有关,那么当关联波门内无有效量测时,可以通过增大综合新息的协方差来扩大关联波门,以保证波门内存在有效量测,即

$$\bar{S}_k = S_k + H \left(\sum_{i=1}^p M_{\sigma_{\max}}^i \right) H^T \quad (9)$$

式中: S_k 由式(2)给出; H 为观测矩阵; $M_{\sigma_{\max}}$ 为关联波门的扩大步长,此处设为最大机动水平所对应的模型误差协方差; p 为关联波门的扩大次数,会对关联性能产生一定的影响。当 p 较小时,如果目标发生较大的机动,来自目标的真实量测有可能不能进入关联波门,从而丢失跟踪的目标,而当 p 较大时,

会影响跟踪算法的实时性,将出现跟踪滞后的情况,因此综合考虑跟踪性能和实时性的要求,实际应用中可将 p 设为 3~5。

Step 2 最优关联波门中心的确定

通过 Step1 扩大关联波门使得波门内存在量测点迹,之后利用量测信息对波门中心进行调整,以改善关联概率。对于特定的目标,假定其机动能力(最大机动加速度)是先验已知的,则可以预测到目标在下一时刻的状态范围。假设只能获得目标的位置观测,即 $\mathbf{z}_k = [x_k \ y_k]^T$,那么可以预测目标在 k 时刻的位置范围 $\Phi_k = \{(x_{k|k-1}, y_{k|k-1}) \in \Phi_k \mid x_{k|k-1}^{\min} \leq x_{k|k-1} \leq x_{k|k-1}^{\max}, y_{k|k-1}^{\min} \leq y_{k|k-1} \leq y_{k|k-1}^{\max}\}$,其中 $(x_{k|k-1}^{\min}, y_{k|k-1}^{\min})$ 和 $(y_{k|k-1}^{\min}, y_{k|k-1}^{\max})$ 分别为目标在 x 和 y 方向上位置量测值的预测范围。在此状态范围之内,以最小均方误差为准则,利用量测信息对关联波门的中心 $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 进行寻优,最优的关联波门中心可表示为

$$\mathbf{z}_{k|k-1}^* = \arg \min_{(x_{k|k-1}, y_{k|k-1}) \in \Phi_k} \text{tr}(\mathbf{I} \mathbf{P}_{k|k}) \quad (10)$$

式中: $\text{tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹; $\mathbf{P}_{k|k}$ 为最终的目标状态估计误差协方差,由式(7)给出; $\mathbf{I} = \text{diag}\{1, \alpha, 1, \alpha\}$ 为权重因子,用以调节位置和速度误差的权重,其中参数 α 可以结合工程实际的具体需求进行设定。由于状态误差协方差 $\mathbf{P}_{k|k}$ 中包含了目标的位置误差和速度误差,二者的量纲不一致,因此需要采用 $\mathbf{I}$ 来调节。

将式(7)代入式(10),由于各个子滤波器进行状态估计时,并未用到波门中心的相关信息,因此变量 $\mu_{k|k}^m$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^m$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 与优化变量 $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 无关,在优化求解时可以看作常值。最终,求解最优波门中心的代价函数可以化简为

$$\min_{(x_{k|k-1}, y_{k|k-1}) \in \Phi_k} \text{tr} \left(\mathbf{I} \sum_{m=1}^M \mu_{k|k}^m [\beta_k^m \mathbf{P}_{k|k-1}^m + (1 - \beta_k^m) \mathbf{P}_{k|k-1}^m + \tilde{\mathbf{P}}_k^m] \right) \quad (11)$$

如式(11)所示, PDA 算法是一种全邻算法,考虑了量测来源可能出现的各种不同情况: $\beta_k^m \mathbf{P}_{k|k-1}^m$ 部分表示当关联波门内没有来自目标的量测时,用预测值进行状态更新后的估计误差协方差; $(1 - \beta_k^m) \mathbf{P}_{k|k-1}^m$ 部分表示当关联波门内存在来自目标的量测时,用综合量测进行状态更新后的估计误差协方差; $\tilde{\mathbf{P}}_k^m$ 部分表示综合量测信息给估计误差所带来的影响,包含了预测信息和量测信息。因此,利用式(11)可以实现最小均方误差意义下对关联波门中心的寻优。其物理意义在于:与传统关联波门设计只依赖于预测信息的处理方式不同,本文方法利用观测信

息调整关联波门中心(如图 1 中的箭头所示),在进行数据关联时,对来源于目标的真实量测赋以较大的概率,可以从本质上改善关联概率。

由于关联概率 β_k^i 包含关于优化变量 $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 的指数项^[4],因此式(11)是高度非线性的优化问题,可以通过序列二次规划方法^[19]进行求解。序列二次规划将优化问题逐步分解成单个可求解的二次规划子问题。为简便起见,省去变量 $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 的下标,式(11)迭代求解的步骤如下:

(1)初始化变量 $\mathbf{z}_0 = [x_{k|k-1} \ y_{k|k-1}]^T$ 和拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}_0 \geq \mathbf{0}$,使得 $\mathbf{z}_0$ 满足问题(11)的约束条件 $(x_{k|k-1}, y_{k|k-1}) \in \Phi_k$,令迭代次数 $i=0$,设定 $\epsilon > 0$;

(2)分别计算拉格朗日函数的海森矩阵 $\mathbf{Y}_i = [\nabla_z L(\mathbf{z}_i, \boldsymbol{\lambda}_i)]^2 = [\nabla_z f(\mathbf{z}_i)]^2 - \boldsymbol{\lambda}_i [\nabla_z c_j(\mathbf{z}_i)]^2$,约束条件关于优化变量 $\mathbf{z}_i$ 的雅克比矩阵 $\mathbf{A}_i = [\nabla_z c(\mathbf{z}_i)]^T$,目标函数的雅克比矩阵 $\mathbf{g}_i = \nabla_z f(\mathbf{z}_i)$,以及约束向量 $\mathbf{c}(\mathbf{z}_i)$;

(3)求解关于搜索方向 δ_z 的二次规划问题

$$\left. \begin{aligned} \min_{\delta_z} \quad & \frac{1}{2} \delta_z^T \mathbf{Y}_i \delta_z + \delta_z^T \mathbf{g}_i \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{A}_i \delta_z \geq -\mathbf{c}_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

然后计算拉格朗日乘子

$$\boldsymbol{\lambda}_{i+1} = (\mathbf{A}_{ii} \mathbf{A}_{ii}^T)^{-1} \mathbf{A}_{ii} (\mathbf{Y}_i \delta_z + \mathbf{g}_i) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{A}_{ii}$ 为起作用的不等式约束条件所构成的一阶导数矩阵;

(4)令 $\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{z}_i + \delta_z$,如果 $\|\delta_z\| \leq \epsilon$,输出 $\mathbf{z}_{k|k-1}^* = \mathbf{z}_{i+1}$,终止迭代;否则令 $i=i+1$,返回步骤(2)。

3 仿真实验与结果分析

3.1 计算机仿真实验

以二维杂波场景中单个机动目标为跟踪对象,将本文方法与在传统 IMM-PDA 方法的基础上扩大关联波门的方法^[15](扩大关联波门法 1)、在综合 IMM-PDA 算法的基础上扩大关联波门的方法(扩大关联波门法 2)以及在综合 IMM-PDA 算法的基础上应用文献[17]的方法进行了对比。

目标运动场景:目标起始位置为 $[21 \ 689 \text{ m}, 10 \ 840 \text{ m}]$,初始速度为 $[-8.3 \text{ m/s}, -399.9 \text{ m/s}]$,具体航迹如图 3 所示。杂波在二维平面内服从均匀分布,具体产生方法详见文献[4]。

状态模型及算法:IMM-PDA 算法由 3 个子模型组成,分别为匀速(CV)模型、机动水平较小的匀加速(CA)模型和机动水平较大的匀加速(CA)模型。状态噪声强度分别为 $q_k^{\text{CV}} = 0.001$ 、 $q_k^{\text{CA1}} = 0.01$

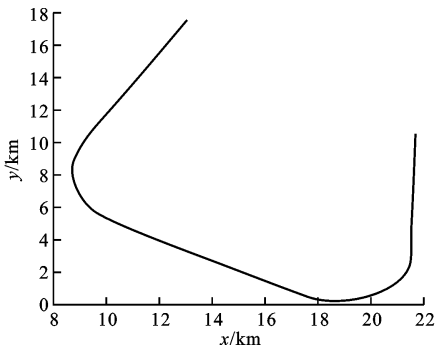


图 3 二维场景中单个机动目标的运动轨迹

和 $q_k^{\text{CA}2} = 10$ 。各模型的初始有效概率为 $\mu_{0|0} = [0.8, 0.1, 0.1]$,模型的转移概率矩阵为

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

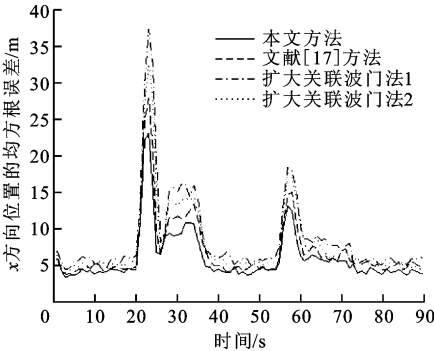
传感器量测及其他参数:采样间隔 $T=1\text{ s}$;假设只有目标位置的量测,即 $n_z=2$; x 和 y 方向观测误差标准差均为 50 m ;检测概率 $P_D=0.997$,门限 $\gamma=9$,由门限 γ 和量测维数 n_z 查表可得 $P_G=0.989$,此时关联波门的体积 $V_k=3\pi|\mathbf{S}_k|^{1/2}$,关联波门扩大时的步长为 $M=\text{diag}[10^2, 10^2]$,关联波门最大扩大次数为 5 。本文方法中,假设目标的发生机动时运动状态的预测观测范围为 $\mathbf{z}_{k|k-1}=[x_{k|k-1}+\Delta x, y_{k|k-1}+\Delta y]^T$,其中 $|\Delta x|\leq 100\text{ m}$, $|\Delta y|\leq 100\text{ m}$ 。仿真结果由 100 次 Monte-Carlo 实验统计得到。

如果连续 4 个采样周期位置估计误差都超过量测标准差的 5 倍,则认为目标丢失。算法性能分别从跟踪精度、失跟率和平均有效量测个数 3 个方面进行评估,其中失跟率表示目标跟踪丢失的次数占总的 Monte-Carlo 仿真次数的比例。平均有效量测个数为在未丢失目标的仿真中,所有有效量测点数在仿真次数和采样次数上的平均,即

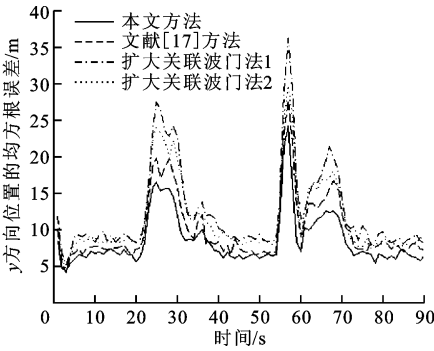
$$\bar{m} = \frac{1}{N_m N_s} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_s} m_{k,i} \quad (15)$$

式中: $m_{k,i}$ 为第 i 次 Monte-Carlo 实验第 k 个采样时刻关联波门内有效量测的点数; N_m 为 Monte-Carlo 实验次数; N_s 为单次 Monte-Carlo 实验的采样点数。

图 4 给出了本文方法与传统方法在 x 和 y 方向上的位置均方根误差。表 1 给出了不同杂波密度下本文方法与传统方法在失跟率和平均有效量测个数方面的对比结果。从图 4 中可以看出,扩大关联波门法 1,即在传统 IMM-PDA 算法的基础上扩大关联波门的方法,跟踪精度最差;将扩大关联波门的方法应用到综合 IMM-PDA 算法(扩大关联波门法 2)



(a)目标 x 方向位置的均方根误差



(b)目标 y 方向位置的均方根误差

图 4 目标位置的均方根误差曲线

之后,跟踪精度有所提高。这是因为传统 IMM-PDA 算法对每个子滤波器构造关联波门,无法得到整个滤波系统最优的量测集合,所以跟踪精度比其他方法都差,而且由于每个子滤波器使用的是不同的量测集合,可能各自跟踪了不同的航迹,因而造成失跟率的增加,这一点从表 1 中可以看出。同样,从图 4 中可以看出,本文方法和文献[17]方法的跟踪精度要好于 2 种扩大关联波门方法。这是因为本文方法和文献[17]的方法在设计关联波门时,利用了量测信息,分别以最小均方误差和最小化量测点迹与波门中心之间的马氏距离为准则,找到了最优波门中心,改善了关联概率,从而提高了跟踪精度,尤其是在目标发生机动时效果更加明显,而本文方法在寻找最优波门中心时,利用了多维量测信息,相比文献[17]的利用单维量测信息更具优势。另外,从表 1 中可以看出,本文方法的失跟率和平均有效量测个数也明显小于其他方法。这是由于本文方法重新调整了波门中心和波门大小,可以得到更优的量测集合,从本质上改善了关联概率,从而降低了失跟率,减少了关联波门内的杂波点数。综上所述,与传统方法相比,本文方法提高了目标机动时的跟踪精度,有效降低了跟踪丢失概率。

表 1 不同杂波密度下 4 种方法的跟踪性能比较

杂波密度/ 个·m ⁻²	失跟率/%				$\bar{m}$			
	扩大关联 波门法 1	扩大关联 波门法 2	文献[17] 方法	本文 方法	扩大关联 波门法 1	扩大关联 波门法 2	文献[17] 方法	本文 方法
4×10^{-7}	15	7	6	4	1.358 7	1.202 3	1.164 8	1.136 0
5×10^{-7}	20	13	11	8	1.386 1	1.252 3	1.209 7	1.157 6
6×10^{-7}	27	18	15	11	1.415 8	1.310 9	1.253 6	1.203 9
7×10^{-7}	36	30	26	21	1.486 3	1.394 2	1.312 3	1.248 2

3.2 实测数据验证

采用某测高雷达恒虚警处理之后的结果作为观测数据,对本文方法进行验证,雷达的扫描周期为 4 s。由于本实测数据针对的是空中目标,恒虚警处理之后的剩余杂波点很少,不能突出本文方法的优势,因此这里又重新在场景中加入密度为 6×10^{-7} 个/m² 的均匀杂波。由于在实际情况中,目标的真实航迹是未知的,因此无法给出本文算法与其他算法的均方根误差的对比,本文在进行实测数据验证时,仅给出了航迹的均值估计结果。在未丢失目标时本文方法和文献[17]方法对目标机动航迹的二维处理结果如图 5 所示。由于扩大关联波门法 1 和 2 在目标机动时波动较大,同时为了图示的清晰起见,图中省略了二者的估计结果。表 2 比较了在 100 次 Monte-Carlo 仿真中 4 种方法的失跟率和平均有效量测个数。可见,实测数据同样验证了本文方法的有效性。

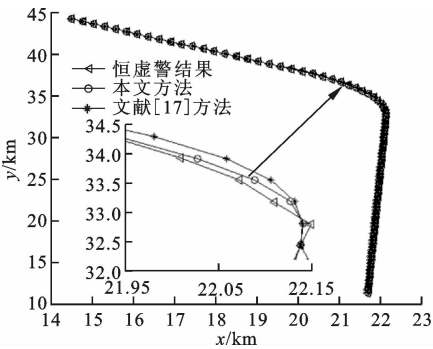


图 5 实测数据时目标位置的跟踪曲线

表 2 实测数据时本文方法与传统方法的比较结果

方法	失跟率/%	$\bar{m}$
扩大关联波门法 1	34	1.425 8
扩大关联波门法 2	22	1.331 4
文献[17]方法	17	1.276 5
本文方法	9	1.145 7

4 结 论

本文在综合 IMM-PDA 算法的框架下,提出一种利用目标运动状态的量测信息进行自适应关联波门设计的方法。在综合 IMM-PDA 算法的基础上进行关联波门设计,可以得到最优的量测集合,进而降低失跟率,提高跟踪精度。本文提出两步法设计关联波门:当波门内无有效量测时,首先逐步扩大波门使得有效量测存在,然后利用观测信息,在目标的状态预测范围内以最小均方误差为准则对关联波门的中心进行寻优。本文方法利用量测信息调整了关联波门的中心和大小,改善了关联概率,得到了更优的量测集合。仿真结果表明,本文方法在跟踪精度和失跟率等方面均优于传统方法。

由于本文采用序列二次规划方法对代价函数进行优化求解,在实时性方面较弱,另外,当波门内不存在有效量测时,本文采取了扩大关联波门的方法进行有效量测确认,在单目标场景下性能较好,但是当存在多目标航迹交叉或者接近的情况时,将有可能发生错跟现象,因此,高效的波门中心寻优方法以及针对杂波中多目标的跟踪问题将是下一步需要研究的内容。

参考文献:

[1] SINGER R A, SEA R G. New results in optimizing surveillance system tracking and data correlation performance in dense multitarget environments [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1973, 18(6): 571-582.

[2] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 536-557.

[3] JIANG X, HARISHAN K, THARMARASA R, et al. Integrated track initialization and maintenance in heavy clutter using probabilistic data association [J].

- Signal Processing, 2014, 94(7): 241-250.
- [4] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 120-129.
- [5] MAZOR E, AVERBUCH A, BAR-SHALOM Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: a survey [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 103-123.
- [6] SIGALOV D, MICHAELI T, OSHMAN Y. Tracking a splitting target in clutter using the IMM methodology [C]//Proceedings of the 27th IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 455-462.
- [7] WANG J, FAN B, LI Y, et al. A novel interacting multiple model particle filter for maneuvering target tracking in clutter [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 35: 177-191.
- [8] BLOM H, BLOEM E A. Exact Bayesian filter and joint IMM coupled PDA tracking of maneuvering targets from possibly missing and false measurements [J]. Automatica, 2006, 42(1): 127-135.
- [9] MUSICKI D, SUVOROVA S. Tracking in clutter using IMM-IPDA-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 111-126.
- [10] MUSICKI D, SONG T L, KIM T H. Smoothing multi-scan target tracking in clutter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(19): 4740-4752.
- [11] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y, BLAIR W D, et al. IMMPDAF for radar management and tracking benchmark with ECN [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115-1133.
- [12] 潘泉, 梁彦, 杨峰, 等. 现代目标跟踪与信息融合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 73-124.
- [13] MUSICKI D, MORELANDE M R. Gate volume estimation for target tracking [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion. Mountain View, CA, USA: International Society of Information Fusion, 2004: 455-462.
- [14] WANG X Z, CHALLA S, EVANS R. Gating techniques for maneuvering target tracking in clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 1087-1097.
- [15] 程婷, 何子述, 李亚星. 一种具有自适应关联门的杂波中机动目标跟踪算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 865-870.
- CHENG Ting, HE Zishu, LI Yaxing. A maneuvering target tracking algorithm with adaptive association gate in clutters [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(4): 865-870.
- [16] WANG M H, WAN Q, YOU Z S. A gate size estimation algorithm for data association filters [J]. Science in China Series: F Information Science, 2008, 51(4): 425-432.
- [17] 刘宗香, 谢维信, 黄敬雄. 一种用于三维空间杂波环境机动目标跟踪的数据互联方法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 848-852.
- LIU Zongxiang, XIE Weixin, HUANG Jingxiong. A data association method for maneuvering target tracking in three-dimensional space under the circumstance of clutter [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4): 848-852.
- [18] 王亚利, 王文海. 基于时变偏差分离估计的杂波下机动目标跟踪 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1408-1410.
- WANG Yali, WANG Wenhai. Maneuvering target tracking in clutter based on separate bias estimation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7): 1408-1410.
- [19] SINGIRESU S R. Engineering optimization: theory and practice [M]. 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009: 229-425.

[本刊相关文献链接]

- 任嘉伟, 贾维敏, 陈辉华, 等. 二进制偏移载波最小均方误差预滤波无模糊跟踪方法. 2013, 47(4): 125-130. [doi: 10.7652/xjtuxb201304021]
- 李世忠, 王国宏, 白晶, 等. 压制干扰下雷达网目标概率多假设跟踪算法. 2012, 46(10): 101-106. [doi: 10.7652/xjtuxb201210018]
- 司栋森, 李增智, 王晓旭. 采用四象限探测器的智能跟踪定位算法. 2012, 46(4): 13-17. [doi: 10.7652/xjtuxb201204003]
- 王晓, 韩崇昭. 用于机动目标跟踪的多模型概率假设密度滤波器. 2011, 45(12): 1-5. [doi: 10.7652/xjtuxb201112001]
- 常国宾, 许江宁, 李安, 等. 迭代无味卡尔曼滤波的目标跟踪算法. 2011, 45(12): 70-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201112013]
- 闫小喜, 韩崇昭. 应用 Dirichlet 分布的概率假设密度多目标跟踪. 2011, 45(2): 6-10. [doi: 10.7652/xjtuxb201102002]
- 刘哲, 卫军胡, 赵军, 等. 多源二维测角信息的三维动态目标跟踪定位算法. 2008, 42(4): 462-465. [doi: 10.7652/xjtuxb200804018]
- 巫春玲, 韩崇昭. 用于弹道目标跟踪的有限差分扩展卡尔曼滤波算法. 2008, 42(2): 143-146. [doi: 10.7652/xjtuxb200802004]

(编辑 刘杨)